

Temperaturinduzierte Veränderung der Schwingungseigenschaften einer Fussgängerbrücke aus Holz mit Gussasphaltbelag

Glauco Feltrin

Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf (CH)

Zusammenfassung: Die Fahr- und Gehbahn moderner Holzbrücken wird oft geschlossen in Form von Platten ausgebildet und als Abrieb- und Witterungsschutz mit einem Gussasphaltbelag versehen. Bei der heutigen Bemessungspraxis von Fussgängerbrücken bezüglich Schwingungen wird der Belag als ständige Last, d.h. als zusätzliche Masse, berücksichtigt. Zwischen der Brückenplatte und dem Gussasphaltbelag herrscht jedoch ein Verbund, der die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen verändern kann. Da der Gussasphaltbelag zudem grossen Temperaturunterschieden ausgesetzt ist und seine Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften stark temperaturabhängig sind, ist zu erwarten, dass sich die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen einer Holzbrücke in Abhängigkeit der Temperatur entsprechend ändern.

Durch Messungen an einer Fussgängerbrücke konnte gezeigt werden, dass die Eigenfrequenzen mit abnehmenden Belagstemperaturen zunehmen. Bezogen auf die Eigenfrequenzen bei hohen Belagstemperaturen betrug die Zunahme ca. 25%. Es konnten auch bedeutende Änderungen der modalen Dämpfungen beobachtet werden (+ 100%). Die modalen Dämpfungen erreichen bei Belagstemperaturen zwischen ca. 15°C und 30°C ein Maximum. Bei tieferen und bei höheren Belagstemperaturen nehmen die modalen Dämpfungen wieder ab. Die beobachteten Messergebnisse konnten mit numerischen Modellen, welche die Änderung der Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Gussasphalts berücksichtigen, nachvollzogen werden. Da die Veränderungen der Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen gross sind, sollten sie bei der Bemessung von Fussgängerbrücken bezüglich Schwingungen berücksichtigt werden.

1 Einführung

Die Fahr- und Gehbahn moderner Holzbrücken wird oft geschlossen in Form von eigentlichen Platten ausgebildet, die aus liegenden, quer vorgespannten Brettschichtholz-Trägern (QS-Platten), Furnierschichtholz- oder Brettsperrholzplatten (Massivholzplatten) hergestellt werden. Als Abrieb- und Witterungsschutz werden diese Fahr- und Gehbahnen mit einem Gussasphaltbelag versehen.

Ab mittleren Spannweiten ist bei diesen Fussgängerbrücken oft das Schwingungsverhalten als Bemessungskriterium (Gebrauchstauglichkeit) massgebend, da schlanke, leichte Fussgängerbrücken aus Holz durch gehende oder laufende Personen zu unangenehmen Schwingungen angeregt werden können. Bei der heutigen Bemessungspraxis von Fussgängerbrücken bezüglich Schwingungen wird der Gussasphaltbelag als ständige Last, d.h. als zusätzliche Masse, berücksichtigt.

Untersuchungen an einer Laborbrücke (Gsell et al. 2008) hatten jedoch gezeigt, dass selbst wenn keine Massnahmen getroffen werden, um einen Verbund zwischen der Holztragkonstruktion und dem Gussasphaltbelag herzustellen, eine Verbundwirkung vorhanden ist, die eine Mitwirkung des Gussasphaltbelages hervorruft. Während für statisch wirkende Kräfte dieser Verbund ohne negative Folgen für die Tragfähigkeit vernachlässigt werden kann, beeinflusst dieser de-facto Verbund die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen der Brücke.



Abb. 1: Ansichten des „Städtlistegs“ in Mellingen.

Während eines Jahreszyklus ist ein Gussasphaltbelag zudem starken Temperaturunterschieden ausgesetzt. Da die Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften eines Gussasphalts stark temperaturabhängig sind, war zu erwarten, dass sich die Eigenfrequenzen und die modalen Dämpfungen einer Holzbrücke mit Gussasphaltbelag in Abhängigkeit der Belagstemperatur ändern.

Die Veränderung der Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen ist von Bedeutung, da sie die personeninduzierten Schwingungen der Brücke beeinflussen. Moderne Bemessungsverfahren (CEN 2004, Heinemeyer et al. 2009) basieren auf einem Beiwert für vertikale oder horizontale Schwingungen, der teils sehr stark von der Eigenfrequenz und Dämpfung der Brücke abhängt. Eine Änderung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung einer Brücke aufgrund des Gussasphaltbelages hat daher einen Einfluss auf das Ergebnis des jeweiligen Bemessungsverfahrens.

Im Projekt „Einfluss der Temperatur auf die modalen Dämpfungen und Eigenfrequenzen von Fussgängerbrücken aus Holz mit Asphaltbelag“, das vom „Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung“ des Bundesamtes für Umwelt (Bafu) unterstützt wurde (Projekt 2010.04), wurde an einer ausgeführten Fussgängerbrücke erstmals experimentell untersucht, wie gross die Änderungen der Eigenfrequenzen und der Dämpfungen sind und wie zuverlässig mit Modellrechnungen diese Änderungen nachvollzogen werden können. Die detaillierten Ergebnisse sind in einem Bericht festgehalten (Feltrin 2012).

2 Versuche

Zur Erfassung des Temperatureinflusses auf die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen wurde an der Fussgängerbrücke „Städtlisteg“ in Mellingen periodische Messungen und ein Monitoring durchgeführt. Ziel der periodischen Messungen war es, die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen der ersten drei Biege-Eigenschwingungen bei verschiedenen Temperaturen zu erfassen. Ziel des Monitoring war es, die aus den periodischen Versuchen ermittelten Eigenfrequenzen mit Messungen während des normalen Betriebs der Fussgängerbrücke zu bestätigen und festzustellen, ob aufgrund der Änderungen der Frequenzen und Dämpfungen eine beobachtbare Änderung der Schwingungsamplituden auftritt.

2.1 Brücke

Die Fussgängerbrücke „Städtlisteg“ in Mellingen (Kanton Aargau) ist insgesamt 58 m lang und weist eine Breite von 2.5 m auf (Abb. 1). Die über drei Felder gespannte Holzkonstruktion weist Spannweiten von 18 m, 22 m und 18 m auf. Im Mittelfeld befinden sich jeweils im Abstand von ca. 3.8 m von den Stützen Gerbergelenke. Der Querschnitt besteht aus vier Brettschichtholzträgern mit den Abmessungen 200 mm x 633 mm (Breite x Höhe). Auf den Brettschichtholzträgern befinden sich Massivholzplatten (MDH/A) mit den Abmessungen 2440 mm x 85 mm (Breite x Höhe). Die Platten sind mit den Brettschichtholzträgern verklebt. Der Gussasphaltbelag wurde im Oktober 2010 erneuert. Er hat eine Dicke von 35 mm und ist direkt auf die Massivholzplatten aufgebracht worden. Detaillierte Informationen zur Brücke sind im Artikel von Fuhrmann (Fuhrmann 2000) zu finden.

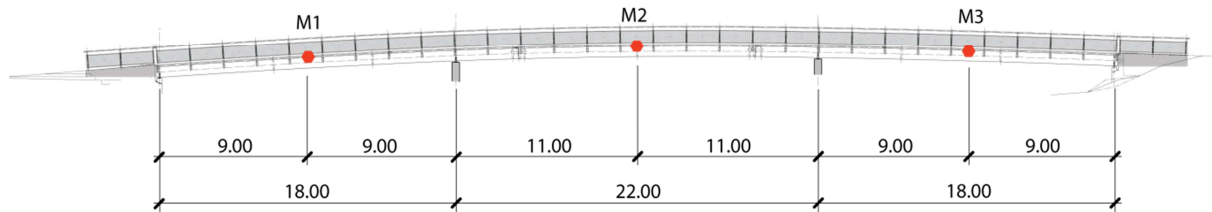


Abb. 2: Lage der Messstellen für die periodischen Messungen.

2.2 Periodische Messungen

Die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen wurden mittels Schwingungen ermittelt, die durch eine Impulsanregung (einmaliges Hüpfen einer Person) verursacht wurden. In einer Messreihe wurde die Impulsanregung mehrmals wiederholt, um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Die Schwingungen wurden an den drei Messquerschnitten M1, M2 und M3 der Brücke erfasst, die in Abb. 2 dargestellt sind. In jedem Messquerschnitt wurden jeweils links und rechts der Fahrbahn die Schwingungen mit je einem Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Um verschiedene Eigenschwingungen anzuregen, wurde das Hüpfen an verschiedenen Stellen der Brücke durchgeführt. Durch das Hüpfen an der Messstelle M1 und M3 wurden die ersten drei Biege-Eigenschwingungen angeregt. Das Hüpfen an der Messstelle M2 regte vor allem die erste und dritte Eigenschwingung an. Die Messungen wurden während mehrerer Stunden ca. alle 30 Minuten wiederholt, um den Einfluss der Temperatur zu untersuchen. Es wurden sowohl die Lufttemperatur wie auch die Belagstemperatur erfasst. Die Belagstemperatur wurde an mehreren Stellen der Brücke in der obersten Schicht der Abdichtungsfugen des Gussasphaltbelages gemessen.

2.3 Monitoring

Das Monitoring wurde mit einem drahtlosen Sensornetz der Firma Decentlab GmbH durchgeführt. Das Sensornetz, das an der Fussgängerbrücke in Betrieb ist, besteht aus 4 Sensorknoten, einem Relaisknoten und der Basisstation. Die Lage der Sensorknoten, N1 bis N4, ist in Abb. 3 ersichtlich. Die Sensorknoten wurden unterhalb der Fahrbahnplatte auf den Pfosten des Geländers montiert (Abb. 4a). Diese Montage sollte das Risiko einer Beschädigung der Sensorknoten durch Vandalismus minimieren. Der Relaisknoten

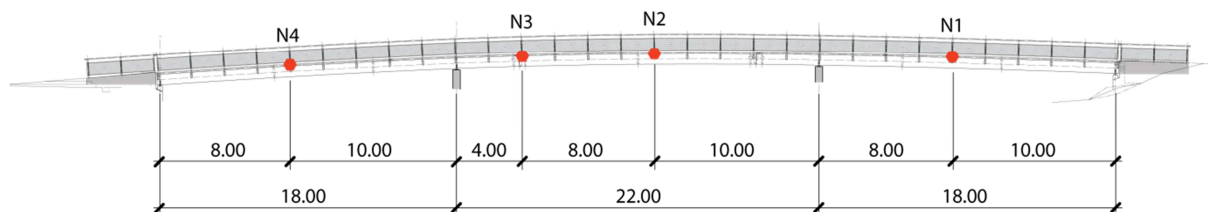


Abb. 3: Lage der Messstellen für das Monitoring.



Abb. 4: Sensorknoten (a), Relaisknoten (b) und Basisstation (c).

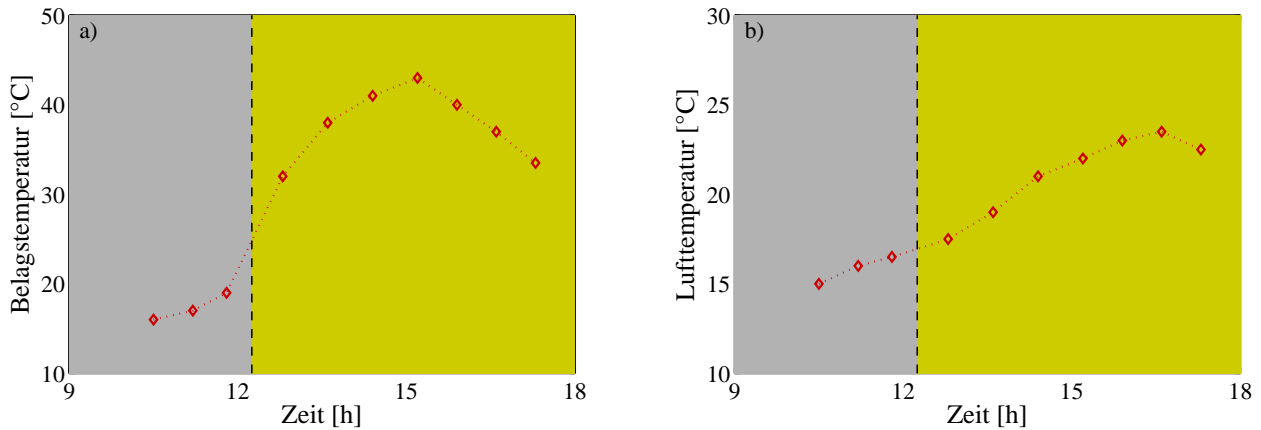


Abb. 5: Belagstemperatur (a) und Lufttemperatur (b).

wurde auf einem Mast der Brückenbeleuchtung befestigt (Abb. 4b). Er sichert die Funkverbindung zwischen den Sensorknoten und der Basisstation, die im Erdgeschoss des Gebäudes des Gemeindehauses eingerichtet wurde (Abb. 4c). Die Basisstation ist über das Mobilfunknetz mit einem Datenserver verbunden.

Die Sensorknoten an den Messstellen N1 und N2 (Abb. 3) erfassen permanent die Beschleunigungen mit einer Abtastrate von 50 Hz. Die Messdaten werden im Sensorknoten in Messreihen von 2048 Messwerten unterteilt und analysiert, um festzustellen, ob ein Ereignis (Schwingungen infolge von Fussgängern auf der Brücke) vorliegt. Das Auftreten eines Ereignisses wird über eine Triggerschwelle (0.02 ms^{-2}) definiert. Überschreiten die gemessenen Schwingungsamplituden die Triggerschwelle, so berechnet der Sensorknoten die Umhüllenden der Messreihe und sendet diese Daten zur Basisstation. Wird die Triggerschwelle hingegen nicht überschritten, so werden die Messdaten durch die folgende Messreihe überschrieben.

Die zweite Gruppe von Sensorknoten erfasst ebenfalls permanent die Beschleunigungen an den Messstellen N3 und N4 (Abb. 3). Die Messdaten werden auch in Messreihen von 2048 Messwerten unterteilt. Da Abtastrate beträgt ebenfalls 50 Hz. Daraufhin wird im Sensorknoten mit einem „Fast Fourier Transform“-Algorithmus die Fourierkomponenten der Messreihe und anschliessend das Frequenzspektrum berechnet. Schliesslich werden die 8 grössten Spitzen des Spektrums mit einem weiteren Algorithmus abgegriffen. Die Frequenzen und die Amplituden der abgegriffenen Spitzen werden zur Basisstation gesendet.

In allen Sensorknoten werden zudem mit einer Periode von 15 Minuten die Lufttemperaturen und die Luftfeuchtigkeit gemessen. Auf die Messung der Asphalttemperatur musste verzichtet werden, da der neue Belag der Fussgängerbrücke ohne Isolationsschicht zwischen Gussasphaltbelag und Brückenplatte ausgeführt wurde. Das Risiko, durch die Installation eines Temperatursensors den Belag zu verletzen und dadurch ein Leck zu erzeugen, das eine Ansammlung von Feuchtigkeit unterhalb des Belages hervorrufen könnte, wurde als zu gross erachtet.

3 Resultate

3.1 Änderungen der Eigenfrequenzen und Dämpfungen

Abb. 5 zeigt die Belagstemperatur und die Lufttemperatur in Funktion der Zeit. Die Eigenfrequenz und Dämpfung der 1. Biege-Eigenschwingung während der gleichen Zeitspanne ist in Abb. 6 wiedergegeben. Es handelt sich um Messungen an einem Tag, an dem der Himmel am Morgen mit dichtem Hochnebel bedeckt war. Zwischen 12 und 13 Uhr löste sich der Hochnebel auf und die Sonne schien bei klarem Himmel auf die Brücke. In diesem Zeitintervall stieg die mittlere Temperatur in der obersten Schicht des Gussasphaltbelages von 18°C auf 32°C . Bis um ca. 15 Uhr stieg dann die mittlere Temperatur weiter auf 43°C , um dann wieder abzunehmen, da Teile der Brücke zunehmend in den Schatten der angrenzenden Häuser fiel. Die gemessene Lufttemperatur zeigte hingegen keinen steilen Anstieg zwischen 12 und 13

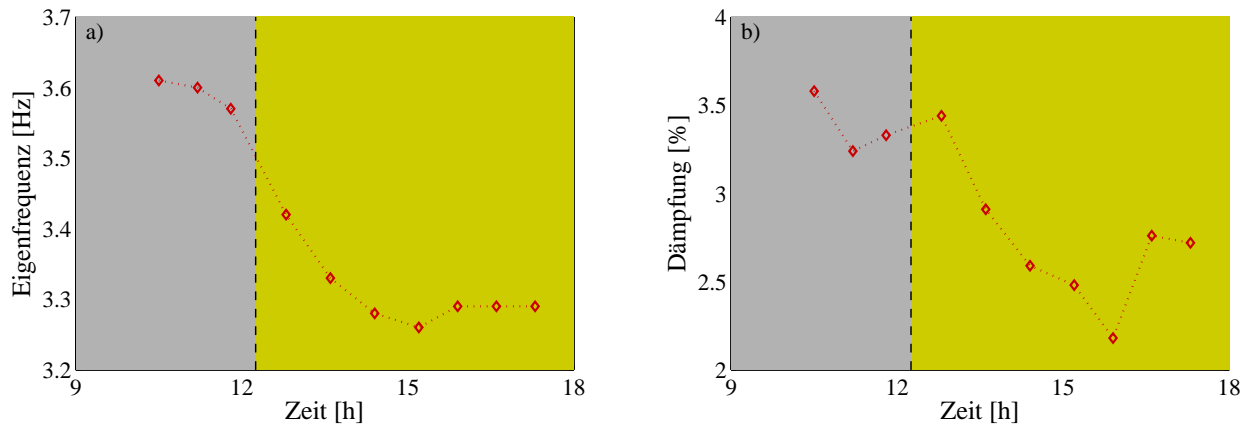


Abb. 6: Eigenfrequenz (a) und Dämpfung (b) der 1. Biege-Eigenschwingung.

Uhr. Ab 12 Uhr ist die Zunahme der Lufttemperatur pro Zeiteinheit grösser. Das Maximum der Lufttemperatur wird zwei Stunden später als das Maximum der mittleren Temperatur des Gussasphaltbelages um ca. 17 Uhr erreicht.

Die Eigenfrequenz der 1. Biege-Eigenschwingung (Abb. 6a) zeigt einen rapiden Abfall ab ca. 12 Uhr, das mit dem Beginn der Auflösung des Hochnebels koinzidiert. Der Abfall der Eigenfrequenz dauert bis ca. 15 Uhr an. Nach 15 Uhr findet eine kleine Zunahme der Eigenfrequenz statt, die bis zum Abschluss der Messungen konstant bleibt. Bemerkenswert ist, dass sich die Eigenfrequenz der 1. Biege-Eigenschwingung in wenigen Stunden um ca. 0.3 Hz verändert hatte.

Ein analoger Abfall ist auch bei der Dämpfung zu erkennen (Abb. 6b). Um 12 Uhr betrug die Dämpfung noch ca. 3.5% während sie um 16 Uhr bereits auf 2.3% gefallen war. Der Abfall der Dämpfung verläuft jedoch gleichmässiger als bei der Eigenfrequenz. Die deutliche Abnahme der Dämpfung ist auch deutlich aus den Ausschwingkurven ersichtlich. Abb. 7 zeigt die Ausschwingkurven für verschiedene Belagstemperaturen (16°C und 40°C). Die mit hohen Belagstemperaturen einhergehende Abnahme der Dämpfung ist an der längeren Ausschwingzeit direkt ersichtlich. Die höhere Steifigkeit der Brücke bei der tieferen Temperatur ist ebenfalls aus den kleineren Schwingungsamplituden erkennbar.

Diese Messergebnisse beweisen, dass die Änderungen der Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen eine Folge der Temperaturänderung des Gussasphaltbelages sind. Sie zeigen aber auch, dass der Zusammenhang zwischen der mittleren Temperatur der obersten Schicht des Gussasphaltbelages und den Eigenfrequenzen nicht eindeutig sind. Die oberste Schicht des Gussasphaltbelages wird durch die Sonneneinstrahlung schneller erhitzt als tiefere Schichten des Gussasphaltbelages. Die oberste Schicht kühlt sich auch schneller ab, wenn die Sonneneinstrahlung wegfällt. Dies führt zu einem Hystereseverhalten zwischen der Temperatur der obersten Schicht und der Eigenfrequenz und Dämpfung. Diese Hysterese ist daher für die Streuung in den Beobachtungen verantwortlich. Darüber hinaus führt der Schattenwurf der

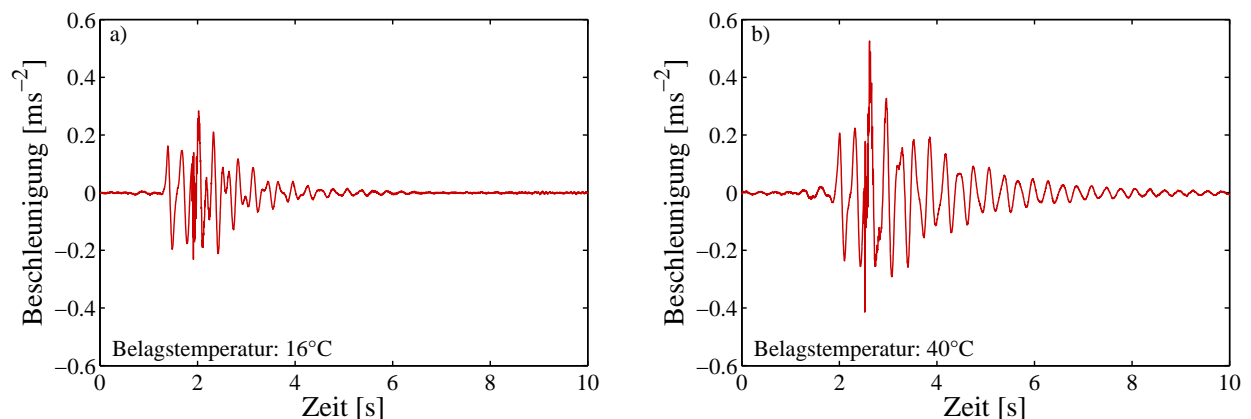


Abb. 7: Ausschwingkurven bei verschiedenen Belagstemperaturen.

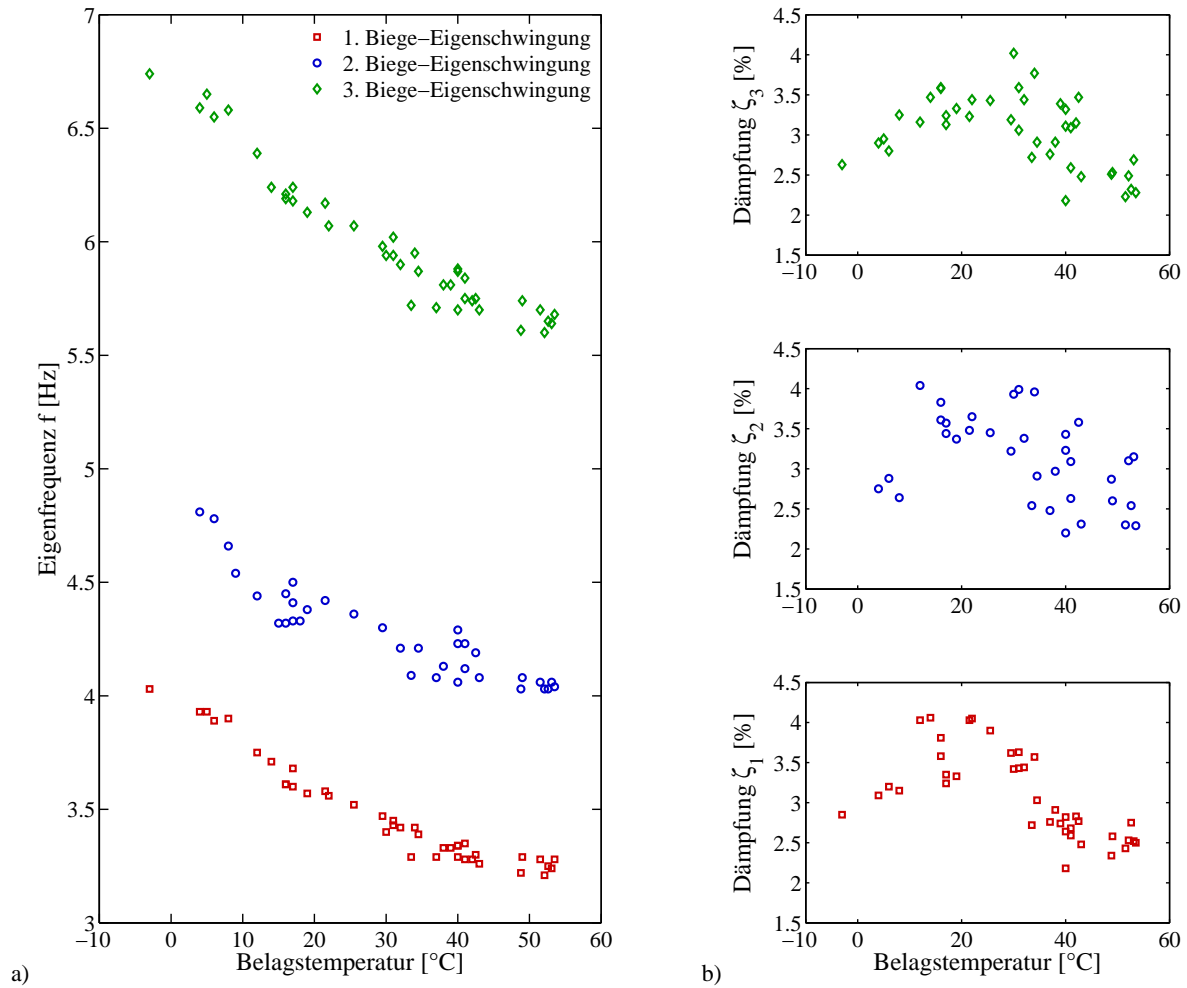


Abb. 8: Gemessene Eigenfrequenzen (a) und modale Dämpfungen (b).

angrenzenden Häuser zu verschiedenen Aufwärm- und Abkühlungsprozessen an verschiedenen Stellen der Brücke, die wiederum zu einer Hysterese zwischen den gemessenen Belagstemperaturen und den Eigenfrequenzen und Dämpfungen führt.

3.2 Änderungen der Eigenfrequenzen und Dämpfungen mit der Belagstemperatur

Abb. 8a stellt die gemessenen Eigenfrequenzen und Dämpfungen der ersten drei Biege-Eigenschwingungen bei verschiedenen Belagstemperaturen dar. Die dargestellten Messergebnisse setzen sich aus mehreren Messungen zusammen, die an verschiedenen Tagen durchgeführt wurden. Die Messergebnisse aus den verschiedenen Tagen fügen sich in kohärenter Weise zusammen.

Im Temperaturbereich zwischen -5°C und 55°C fällt die Eigenfrequenz der 1. Biege-Eigenschwingung von 4.05 Hz auf 3.22 Hz ab. Die Änderung der Eigenfrequenz beträgt damit 0.85 Hz. Bezogen auf die Eigenfrequenz bei hohen Lufttemperaturen (ca. 3.2 Hz) stellt dies eine relative Änderung von ca. 25% dar. Analoge Trends zeigen auch die Eigenfrequenzen der 2. und 3. Biege-Eigenschwingungen auf. Die Änderungen der Eigenfrequenzen über den gemessenen Temperaturbereich betragen ca. 0.85 Hz bzw. 1.1 Hz.

Die modalen Dämpfungsmasse (Abb. 8b) zeigen hingegen zuerst eine Zunahme mit der Belagstemperatur (Temperaturbereich -5°C bis ca. 20°C), um dann mit weiter steigender Temperatur wiederum abzunehmen. Die kleinsten Dämpfungen, ca. 2 %, wurden bei hohen Belagstemperaturen gemessen. Die grössten Dämpfungen betragen etwa 4%. Die Streuung ist bei den Dämpfungen grösser als bei den Eigenfrequenzen.

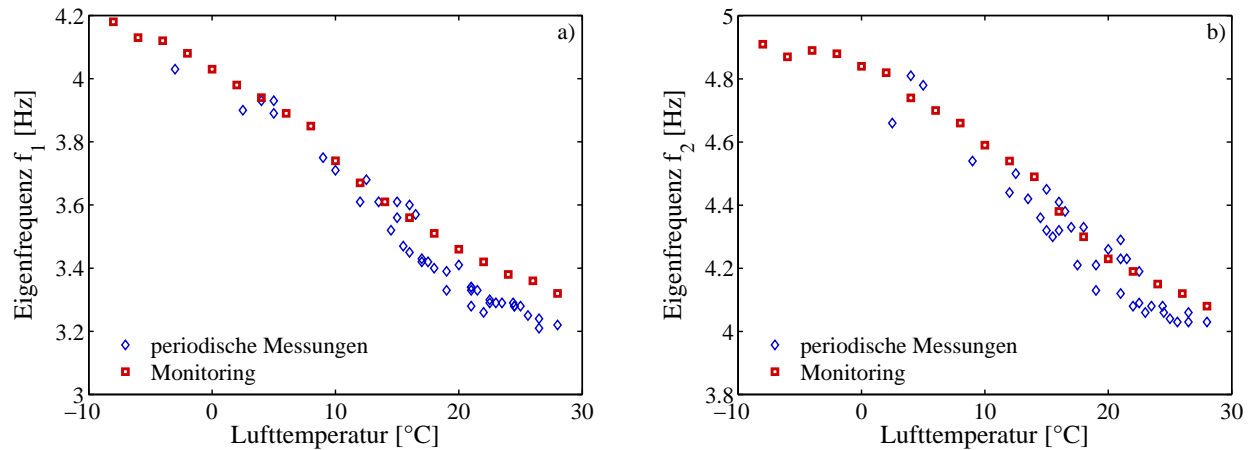


Abb. 9: Eigenfrequenz der ersten (a) und zweiten (b) Biege-Eigenschwingung.

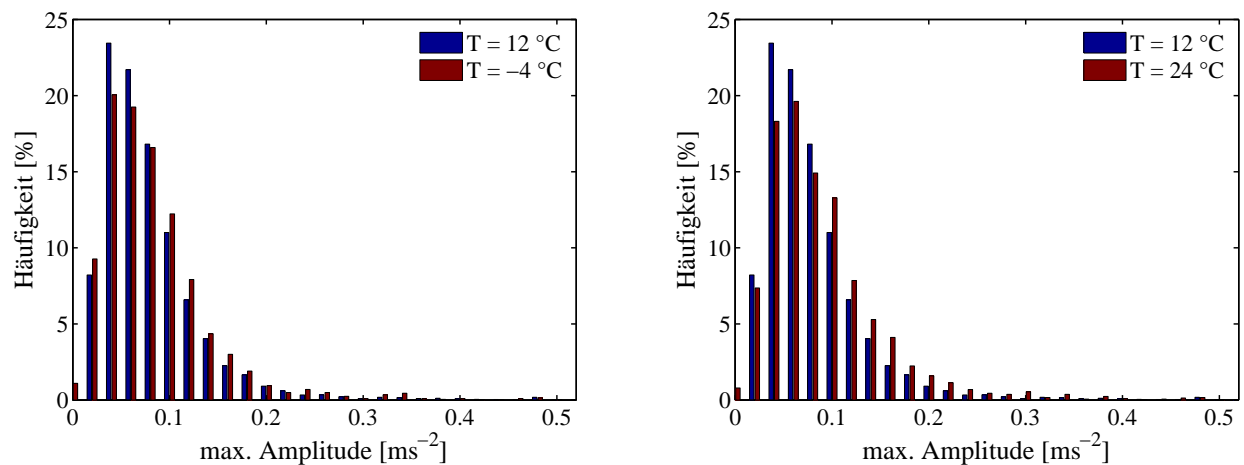


Abb. 10: Häufigkeitsverteilungen der max. Schwingungsamplituden bei verschiedenen Temperaturen.

Das Ergebnis des Monitorings bestätigt die Eigenfrequenzen, die aus den periodischen Messungen ermittelt wurden. Abb. 9 vergleicht die aus den periodischen Messungen und dem Monitoring ermittelten Eigenfrequenzen der ersten zwei Biege-Eigenschwingungen. Die Eigenfrequenzen sind als Funktion der Lufttemperatur aufgetragen. Die mit dem Monitoring erzielten Ergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen aus den periodischen Messungen überein. Da die Messungen aus dem Monitoring zwar bei ähnlichen Temperaturen jedoch zu ganz verschiedenen Zeiten erfasst wurden, bestätigen sie die Korrelation zwischen den Eigenfrequenzen und der Temperatur.

Die Eigenfrequenzen der 1. Biege-Eigenschwingung aus dem Monitoring sind oberhalb von ca. 15°C um ca. 0.1 Hz grösser als die Eigenfrequenzen aus den periodischen Messungen. Dieser Unterschied dürfte auf die deutlich höheren Schwingungsamplituden bei den Stossversuchen zurückzuführen sein.

3.3 Einfluss auf die Schwingungsamplituden

Aus den Umhüllenden der Schwingungsamplituden eines Ereignisses wurden die max. Amplituden berechnet. Abb. 10 vergleicht die Häufigkeitsverteilung an der Messstelle N2 bei drei verschiedenen Lufttemperaturen. Die Häufigkeitsverteilung bei -4°C weist im Amplitudenbereich zwischen 0.1 ms⁻² und 0.3 ms⁻² erhöhte Häufigkeitswerte im Vergleich zur Häufigkeitsverteilung bei 12°C auf. Im Gegensatz dazu weist sie im Amplitudenbereich zwischen 0.04 ms⁻² und 0.1 ms⁻² kleinere Häufigkeitswerte auf als die Häufigkeitsverteilung bei 12°C. Dieser Sachverhalt ist bei einer Lufttemperatur von 24°C noch ausgeprägter. Die grösseren Schwingungsamplituden bei tiefen und hohen Temperaturen sind konsistent mit den kleineren Dämpfungen in diesen Temperaturbereichen, die aus den periodischen Messungen bestimmt wurden. Ein Vergleich zeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen im Temperaturbereich 10°C bis 20°C nicht unterscheidbar sind (Feltrin 2012). Die Änderungen der Schwingungsamplituden sind insge-

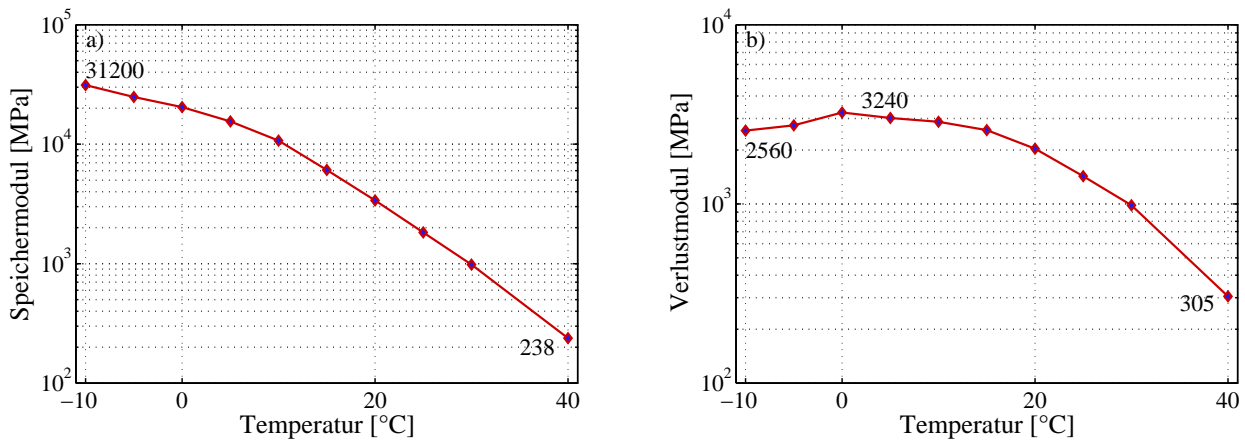


Abb. 11: Speichermodul (a) und Verlustmodul (b) eines Gussasphaltes.

samt sehr klein (häufigste Werte der max. Amplituden um ca. 0.06 ms^{-2}), da die Anregung durch die zweite harmonische der Schrittfrequenz erfolgt und die Dämpfung der Brücke bedeutend ist.

4 Modellierung

Das Ziel der Modellierung war, zu untersuchen, wie zuverlässig mathematische Modelle die an der Fussgängerbrücke gemessenen Änderungen der Eigenfrequenzen und Dämpfungen wiedergeben können. Die Modellierung der Fussgängerbrücke erfolgte mit der Methode der Finiten Elemente. Es wurden Balkenmodelle und ein 3D-Modell der Brücke untersucht.

Für die Modellierung des Gussasphalts wurde ein viskoelastisches Materialmodell gewählt. Die viskoelastischen Materialeigenschaften wurden in Form eines komplexen Elastizitätsmoduls dargestellt. Die Materialkennwerte bei verschiedenen Temperaturen und Belastungsgeschwindigkeiten wurden mit zyklischen Versuchen an einem typischen Gussasphalt ermittelt (Gsell et al. 2008). Abb. 11 zeigt die Messwerte des Speichermoduls und des Verlustmoduls des komplexen Schubmoduls des untersuchten Gussasphaltbelages bei Temperaturen zwischen -10°C und 40°C und einer Belastungsfrequenz von 3 Hz. Die Steifigkeit des Gussasphalts wird mit zunehmender Temperatur immer kleiner. Im gemessenen Temperaturbereich beträgt die Änderung des Speichermoduls zwei Größenordnungen. Die Änderung des Verlustmoduls im selben Temperaturbereich beträgt hingegen nur etwa eine Größenordnung. Wie der Speichermodul nimmt auch der Verlustmodul mit steigender Temperatur generell zu.

Die Holzbauteile sind mit einem transversal-isotropen Material modelliert worden. Die Materialkennwerte der Holzbauteile wurden so angepasst, dass die berechneten Eigenfrequenzen der ersten drei Biege-Eigenschwingungen der Brücke bei hohen Belagstemperaturen ausreichend gut mit den gemessenen Eigenfrequenzen übereinstimmen. Die Dämpfung der Holzbauteile wurde mit 2% angenommen.

In Abb. 12 werden die berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen und Dämpfungen verglichen. Unter der Modellannahme eines vollständigen Verbundes zwischen der Brückenplatte aus Holz und dem Gussasphaltbelag überschätzen die berechneten Änderungen (Balkenmodell) deutlich die gemessenen Änderungen der Eigenfrequenzen und Dämpfungen. Die qualitativen Verläufe der Änderungen der Eigenfrequenzen und insbesondere auch der Dämpfungen stimmen jedoch überein.

Eine bessere Übereinstimmung zwischen den Berechnungen und den Messungen erhält man, wenn ein teilweiser Verbund angenommen wird. Der teilweise Verbund wird durch eine gleichmässig verteilte, linear elastische Kopplung zwischen der Oberfläche der Brückenplatte und der Unterfläche des Gussasphaltbelages modelliert (3D-Modell). Durch die Wahl eines geeigneten Kennwerts der elastischen Kopplung konnten im untersuchten Temperaturbereich die berechneten Eigenfrequenzen mit ausreichender Genauigkeit an die gemessenen Eigenfrequenzen angepasst werden. Die Änderung der Dämpfung wird auch bei teilweisem Verbund noch etwas überschätzt.

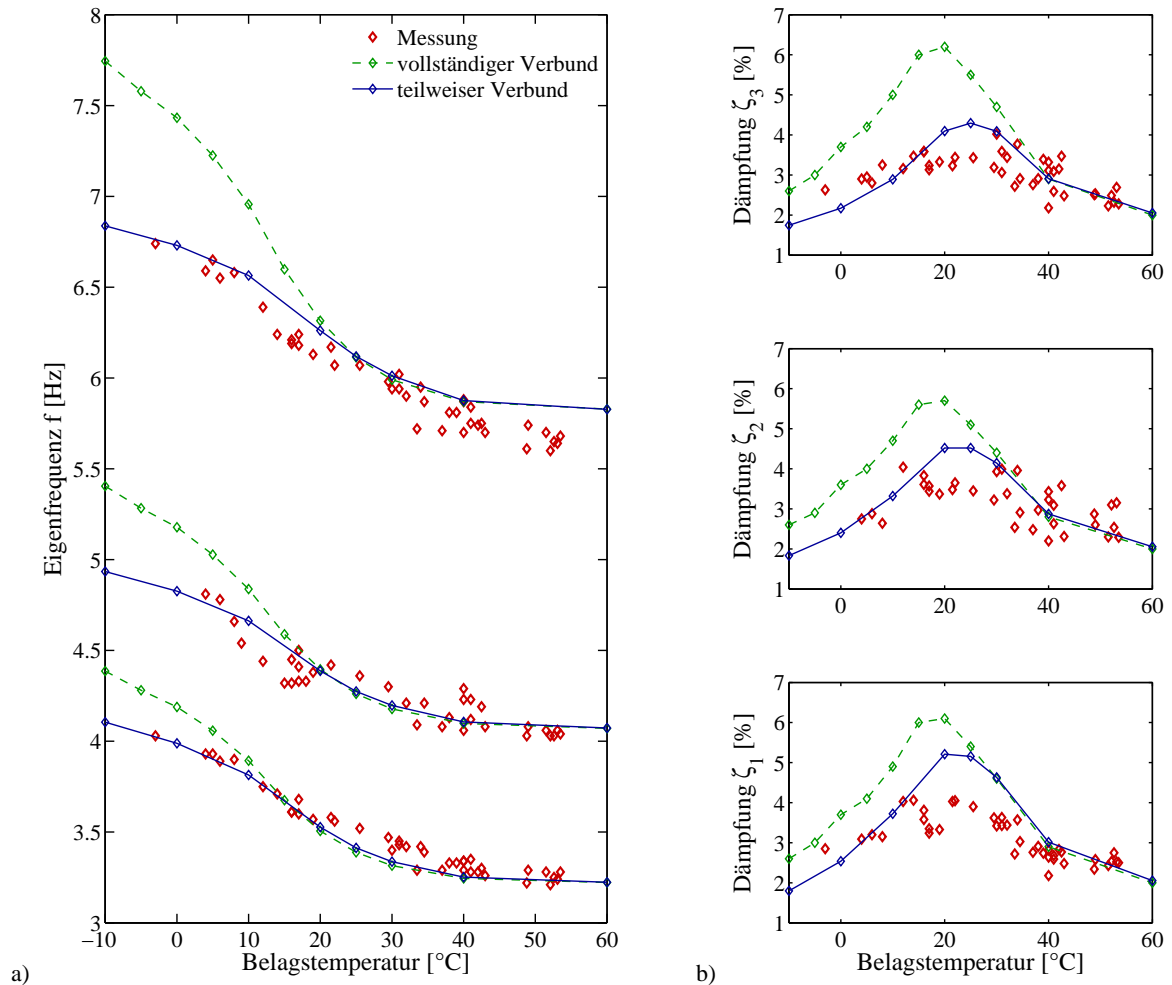


Abb. 12: Vergleich der gemessenen und berechneten Eigenfrequenzen (a) und Dämpfungen (b).

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Messungen an der Fussgängerbrücke „Städtlisteg“ zeigten, dass bedeutende Änderungen der Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen auftreten. Die Eigenfrequenzen nahmen mit abnehmenden Belagstemperaturen um ca. 25% zu. Es konnten auch bedeutende Änderungen der modalen Dämpfungen beobachtet werden. Die grössten Werte (ca. 4% der kritischen Dämpfung) erreichen die modalen Dämpfungen bei Belagstemperaturen zwischen ca. 15°C und 30°C. Bei tieferen und bei höheren Belagstemperaturen nahmen die modalen Dämpfungen auf ca. 2% der kritischen Dämpfung ab. Weniger detaillierte Messungen an zwei weiteren Fussgängerbrücken belegen ebenfalls eine Änderung der Eigenfrequenzen und der Dämpfung mit der Belagstemperatur (Feltrin 2012). Bei diesen Brücken ist eine Abdichtungsschicht zwischen der Holzkonstruktion und dem Belag vorhanden.

Die beobachteten Messergebnisse konnten mit Modellen, welche die Änderung der Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften des Gussasphalts mit der Temperatur berücksichtigen, nachvollzogen werden. Die Modellannahme eines vollständigen Verbundes führte zu einer Überschätzung der Änderung der Eigenfrequenzen und der Dämpfungen. Unter der Annahme, dass ein elastischer Verbund zwischen der Brückenplatte und dem Gussasphaltbelag herrschte, führten Modelle zu Resultaten, die gut mit den Messungen übereinstimmen.

Insgesamt liefern die experimentellen und theoretischen Ergebnisse wichtige Hinweise, dass die mit der Temperaturänderung verbundene Änderung des Speicher- und Verlustmoduls des Gussasphaltbelages die Ursache für die an der Fussgängerbrücke „Städtlisteg“ beobachteten Änderungen der Eigenfrequenzen und der modalen Dämpfungen ist.

Da die Änderungen der Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen bedeutend sind, sollten sie bei der Bemessung von Fussgängerbrücken bezüglich Schwingungen berücksichtigt werden. Da eine Quantifizierung des Verbundes zwischen der Brückenplatte aus Holz und dem Gussasphaltbelag noch nicht möglich ist, wird vorläufig empfohlen, die Berechnung der Eigenfrequenzen unter der Annahme eines vollständigen Verbundes durchzuführen. Auf eine pauschale Zunahme der Dämpfung aufgrund des Gussasphaltbelages ist bei der Bemessung vorerst zu verzichten.

Mit diesem Projekt konnte ein erster wichtiger Schritt vorgenommen werden, um den Einfluss des Gussasphaltbelages auf die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen von Fussgängerbrücken bei sich ändernder Temperaturen nachzuweisen und zu verstehen. Die bisherigen Ergebnisse müssen jedoch mit weiteren Messungen abgesichert werden. Die noch offene Frage des Verbundes zwischen dem Gussasphaltbelag und der Brückenplatte muss mit weiteren Untersuchungen geklärt werden, damit präzisere und gesichertere Empfehlungen für die Praxis formuliert werden können.

Verdankung

Mein grosser Dank geht an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung des Bundesamtes für Umwelt (Bafu) und der Empa, die das Projekt finanziell unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt auch der Gemeinde Mellingen (AG), der Firma Fuhrmann Ingenieurbüro für Holzbau, Unterseen, der Firma Decentlab GmbH, Dübendorf, und meinen Arbeitskollegen Dr. Sandy Schubert, Dr. René Steiger und Dr. Benedikt Weber für ihre wertvolle Mitwirkung.

Literatur

- CEN (2004) EN 1995-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 2: Bridges. European Committee for Standardization CEN,
- Feltrin, G. (2012) *Einfluss der Temperatur auf die modalen Dämpfungen und Eigenfrequenzen von Fussgängerbrücken aus Holz mit Asphaltbelag*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf, (<http://www.bafu.admin.ch/wald/01234/01238/index.html?lang=de>).
- Fuhrmann, C. (2000) Der neue Städtlisteg in Mellingen. *Schweizer Holzbau*, 66 (6), 8-11.
- Gsell, D., Gülzow, A., Hugener, M., Pizio, S., Schubert, S. & Steiger, R. (2008) *Schwingungsverhalten von seilverspannten Holzplattenbrücken für Fussgänger und Radfahrer*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Dübendorf, (<http://www.bafu.admin.ch/wald/01234/01238/index.html?lang=de>).
- Heinemeyer, C., Butz, C., Keil, A., Schlaich, M., Goldack, A., Trometer, S., Lukic, M., Chabrolin, B., Lemaire, A., Martin, P.-O., Cunha, Á. & Caetano, E. (2009) *Design of lightweight footbridges for human induced vibrations*. JRC Scientific and Technical Reports, EUR 23984 EN. Luxembourg,